

MODULARIO  
LCA - 101

Rec'd PCT/PTO 05 JAN 2005

PCT/EP 0 3.1.07.048

Tel 806

**Ministero delle Attività Produttive**  
**Direzione Generale per lo Sviluppo Produttivo e la Competitività**  
**Ufficio Italiano Brevetti e Marchi**  
**Ufficio G2**

REC'D 06 OCT 2003

WIPO PCT

Autenticazione di copia di documenti relativi alla domanda di brevetto per **Invenzione Industriale**  
N. TO2002 A 000585



*Si dichiara che l'unita copia è conforme ai documenti originali  
depositati con la domanda di brevetto sopraspecificata, i cui dati  
risultano dall'accluso processo verbale di deposito.*

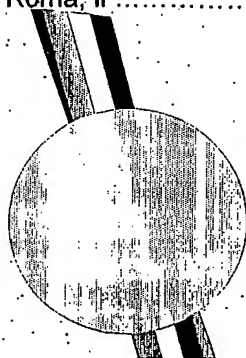
**PRIORITY  
DOCUMENT**  
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN  
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)

Roma, li

7 AGO. 2003

IL DIRIGENTE

Ing. DI CARLO



BEST AVAILABLE COPY

## MODULO A

marca  
da  
bello

TELECOM ITALIA LAB · S.p.A.

N.6.

1 SF

cognome nome \_\_\_\_\_ cod fiscale \_\_\_\_\_

denominazione studio di appartenenza \_\_\_\_\_

via G. Reiss Romoli n. 274 città TORINO cap 10148 (prov) TO

D. TITOLO classe proposta [aa2/cl/aacl]    gruppo/sottogruppo   /      
**METODO, SISTEMA E DISPOSITIVO PER MISURARE LA DISPERSIONE DI POLARIZZAZIONE DI**  
**UNA FIBRA OTTICA**

SE ISTANZA: DATA 11/11/11 N° PROTOCOLLO 111111

COGNOME NAME

INVENTARIATO	COGNOME NOME	COGNOME NOME
1) CAPONI Renato	3) ROCCATO Diego	
2) POTENZA Marcello	4) SCHIANO Marco	

nazione o organizzazione	tipo di priorità	numero di domanda	data di deposito	allegato S/R	Data	N° Protocollo
--------------------------	------------------	-------------------	------------------	-----------------	------	---------------

**N. 13.**

Doc. 1)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text" value="PRQV"/>	n. pag.	<input type="text" value="28"/>	riassunto con disegno principale, descrizione e rivendicazioni (obbligatorio l' esemplare) .....
Doc. 2)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text" value="PRQV"/>	n. tav	<input type="text" value="92"/>	disegno obbligatorio se citato in descrizione, l'esemplare .....
Doc. 3)	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="RIS"/>			lettera d'incarico, procura o riferimento procura generale .....
Doc. 4)	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="RIS"/>			designazione inventore .....
Doc. 5)	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="RIS"/>			documenti di priorità con traduzione in italiano .....
Doc. 6)	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="RIS"/>			autorizzazione o atto di cessione .....
Doc. 7)	<input type="checkbox"/>				nomativo completo del richiedente .....

Euro 291,80=====

//  
//  
//  
//  
 confronto singole priorità  
//

COMPILATO IL 195/197/2002 FIRMA DEL(I) RICHIEDENTE (I) [p.p. TELECOM ITALIA LAB S.p.A.]

CONTINUA SI/NO Ing

DEL PRESENTE ATTO SI RICHIEDE COPIA AUTENTICA SI/NO Si

Carlo CASUCCIO

CAMERA DI COMMERCIO I. A. A. DI TORINO codice 01

VERBALE DI DEPOSITO      NUMERO DI COMANDA 31 2002 A 000505

L'anno MMXXIX DUEMILADUE, il giorno 20, del mese di LUGLIO

1) (i) richiedente(i) sopraindicato(i) ha(hanno) presentato a me sottoscritto la presente domanda, corredata di n. 1 fogli aggiuntivi per la concessione del brevetto sopraportato.

### 1. ANNOTAZIONI VARIE DELL'UFFICIALE ROGANTE

## IL DEPOSITANTE

Aurora NURISSO

**UFFICIALE REGANTE**

Enrico MIGLIO  
CATEGORIA 6

RIASSUNTO INVENZIONE CON DISEGNO PRINCIPALE

PROSPETTO A

NUMERO DOMANDA

10 2002 A 000585

DATA DI DEPOSITO

05.07.2002

NUMERO BREVETTO

DATA DI RILASCIO

A. RICHIEDENTE (I)

Denominazione

TELECOM ITALIA LAB S.p.A.

Residenza

Via R. Romoli, 274 - 10148 TORINO

D. TITOLO

METODO, SISTEMA E DISPOSITIVO PER MISURARE LA DISPERSIONE DI POLARIZZAZIONE DI UNA FIBRA OTTICA

Classe proposta (sez./cl./sc./l.)

(gruppo/sottogruppo)

L. RIASSUNTO

Il presente trovato si riferisce ad un nuovo modello di interpretazione delle misure interferometriche atto a condurre ad un nuovo metodo, sistema 10 e dispositivo 27 per misurare la PMD (Dispersione di Polarizzazione o Polarisation Mode Dispersion) di una fibra ottica 11. Il modello, che si basa sulla teoria di propagazione del segnale ottico come determinabile sulla base dei cosiddetti Stati Principali di Polarizzazione (PSPs) della fibra, porta ad una nuova interpretazione dell'interferogramma generato con le misure interferometriche ed è caratterizzata dal fatto di individuare in tale interferogramma un picco centrale e due lobi laterali. Grazie a tale nuovo modello è possibile determinare la PMD della fibra sulla base del contenuto informativo associato ad almeno uno dei due lobi laterali individuati nell'interferogramma. (Fig. 2)

M. DISEGNO

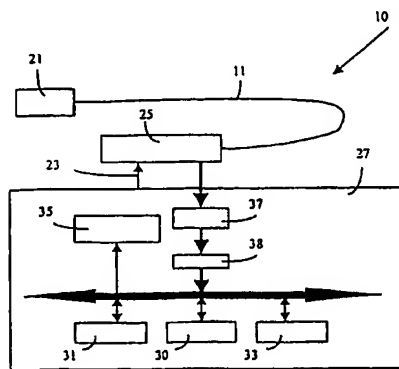


Fig. 2



CC-0000  
Tomo

CLASSE INTERNAZIONALE G01B 9/02

Descrizione dell'invenzione industriale avente per titolo:

"Metodo, Sistema e Dispositivo per Misurare la Dispersione di Polarizzazione di una Fibra Ottica"

a nome TELECOM ITALIA LAB S.p.A.

di nazionalità Italiana, con sede in via Reiss Romoli N. 274,  
10148 TORINO, Italia.

Inventori: CAPONI Renato, POTENZA Marcello, ROCCATO Diego,  
SCHIANO Marco.

Depositata il

5 LUG. 2002

10 2002 A 000585

Telecom Italia Lab S.p.A.

TESTO DELLA DESCRIZIONE

SETTORE DELLA TECNICA

La presente invenzione si riferisce ad un metodo per misurare la dispersione di polarizzazione o PMD (Polarisation Mode Dispersion) di una fibra ottica, al sistema atto a permetterne l'applicazione ed al dispositivo atto ad effettuare le misure di PMD secondo tale metodo.

ARTE NOTA

Come noto La dispersione di polarizzazione è un fenomeno di distorsione del segnale ottico che si propaga nelle fibre ottiche monomodali, cioè fibre ottiche che trasportano i segnali in un modo fondamentale di propagazione costituito da una coppia di modi degeneri a polarizzazione ortogonale. Tale fenomeno è, come noto, legato alla duplice degenerazione del modo fondamentale delle fibre ottiche.

Infatti, imperfezioni costruttive nelle fibre reali (ellitticità del nucleo, stress esterni, ecc.) comportano diverse velocità di gruppo per i due modi degeneri del segnale ottico trasmesso ad un capo della fibra e quindi distorsioni del segnale ricevuto da un dispositivo di ricezione (ricevitore) posto ad un secondo capo della fibra.

E', pertanto, importante disporre di tecniche accurate di misura della PMD per poter caratterizzare, ad esempio, impianti di telecomunicazioni che utilizzino la fibra ottica per il trasporto dei segnali, in particolare, nel caso di impianti trasmissivi al alta velocità o capacità, ad esempio a velocità uguale o superiore a 10 Gbit/sec.

La misura della PMD delle fibre è effettuata, ad esempio, collegando uno spezzone di fibra ottica (fibra) 11 da caratterizzare ad opportuni strumenti o dispositivi 10 (Fig.1) di misura.

Dall'articolo "Polarization Mode Dispersion of Short and Long Single-Mode Fibers" a nome N. Gisin et al, pubblicata sul "Journal of Lightwave Tech." Vol.9 in data 7 luglio 1991, è noto, ad esempio, uno strumento 10 di misura della PMD, che comprende una sorgente ottica 21 (Fig.1, Fig.2), atta a generare segnali ottici da applicare alla fibra 11, un interferometro di Michelson (interferometro) 25 collegato al secondo capo della fibra 11, atto ad applicare ritardi di gruppo o DGD (Differential Group Delay) variabili al segnale

ottico ricevuto e, in uscita all'interferometro 25, un dispositivo di misura 27 atto a convertire i segnali ottici in segnali elettrici e ad elaborare, sulla base di moduli di programma in esso memorizzati, i segnali elettrici ricevuti.

Secondo l'arte nota, i segnali elettrici ricavati a valle dell'interferometro 25 sono rappresentati graficamente dal dispositivo di misura 27 mediante un interferogramma avente in ascisse valori di sbilanciamento temporale introdotti dall'interferometro e in ordinata valori di intensità della foto-corrente generata.

In particolare, secondo l'articolo citato, tale interferogramma è da interpretare come una distribuzione Gaussiana di PMD della fibra, per cui la PMD stessa è determinabile sulla base della deviazione standard della curva Gaussiana che meglio interpola l'interferogramma.

Tale tipo di interpretazione dei segnali elettrici deriva dal fatto di applicare alla fibra 11 un modello di propagazione denominato modello a lamine, in inglese "waveplate model", che consiste nel considerare la fibra ottica reale come un gran numero di lamine birifrangenti poste l'una in cascata all'altra ed aventi assi principali orientati casualmente.

Questo modello viene utilizzato, come noto, per effettuare valutazioni di tempi di volo del segnale, nell'ipotesi che ad ogni interfaccia tra una lamina e la successiva, il segnale

ottico si accoppi casualmente sugli assi principali della lamina a valle.

Sulla base del modello noto e nell'ipotesi, per altro realistica, che la lunghezza della fibra sia molto maggiore della lunghezza d'accoppiamento tra le polarizzazioni, l'arte nota conclude che la rappresentazione grafica misurata corrisponda ad una Gaussiana con una deviazione standard pari a due volte le deviazione standard del segnale ottico e quindi indicativa della PMD della fibra.

Si ritiene, però, che le misura ottenute prendendo a riferimento il modello noto, non corrispondono in modo preciso a valori di PMD reali.

In sostanza si ritiene che le conclusioni dell'arte nota che si basano sulla identificazione della distribuzione dei tempi di volo del segnale ottico con la distribuzione del campo elettrico, siano errate.

Si ritiene, anche, che le misure di PMD ricavate secondo il modello noto siano di conseguenza solo approssimativamente corrette.

#### DESCRIZIONE DELL'INVENZIONE

Il problema tecnico che la presente invenzione intende affrontare è quello di determinare un nuovo modello di propagazione della fibra che porti, in primo luogo, ad un nuovo metodo, per misurare la PMD della fibra, più realistico in tutte le condizioni di calcolo.



Telecom Italia Lab S.p.A.

La presente invenzione intende, pertanto, risolvere il problema tecnico esposto mediante un nuovo modello di interpretazione dell'interferogramma e di conseguenza un nuovo metodo, sistema e dispositivo per determinare la PMD della fibra così come rivendicati.

In particolare, il nuovo modello che si basa sulla teoria di propagazione del segnale ottico come determinabile sulla base dei cosiddetti Stati Principali di Polarizzazione (PSPs) della fibra, porta ad una nuova interpretazione dell'interferogramma caratterizzata dal fatto di individuare in tale interferogramma un picco centrale e due lobi laterali.

Grazie a tale nuovo modello è possibile determinare la PMD della fibra sulla base del contenuto informativo associato ad almeno uno dei lobi laterali individuati nell'interferogramma.

#### DESCRIZIONE SINTETICA DELLE FIGURE

Questa ed altre caratteristiche della presente invenzione risulteranno chiare dalla seguente descrizione di una forma preferita di esecuzione, fatta a titolo esemplificativo e non limitativo con l'ausilio degli annessi disegni, in cui:

Fig. 1 Rappresenta uno schema generale di sistema di misura che utilizza il metodo interferometrico (IM);

Fig. 2 rappresenta uno schema a blocchi del sistema di Fig.1;

Fig. 3 rappresenta uno schema di principio del modello della sorgente ottica alla base del metodo secondo l'invenzione; e



Fig. 4 rappresenta un esempio di risultati ottenuti con il metodo secondo l'invenzione.

#### DESCRIZIONE DI UNA FORMA PREFERITA DI REALIZZAZIONE

Con riferimento alla Fig. 2, lo strumento o sistema di misura della PMD atto ad utilizzare il metodo interferometrico (sistema di misura o apparato IM) 10 comprende, in particolare, un interferometro 25 e un dispositivo di misura 27 collegato in uscita all'interferometro 25 stesso ed atto a controllarne il funzionamento, in modo noto, mediante un collegamento di controllo 23.

Il dispositivo di misura 27 comprende, ad esempio, un unità di controllo (CPU) 30, un'unità di memoria di sola lettura (ROM) 31 ed un'unità di memoria ad accesso casuale (RAM) 33, tutti di tipo noto e collegati fra loro in modo noto per mezzo di un canale dati, controlli e comandi (BUS).

Il dispositivo di misura 27 comprende, inoltre, un dispositivo di visualizzazione (display) 35, noto in sé, e un modulo optoelettronico 37 associato ad un amplificatore 38, atti, rispettivamente, a convertire i segnali ottici provenienti dall'interferometro 25 in segnali elettrici e ad amplificarli; il display 35 e l'amplificatore 38, sono collegati, in modo noto, al BUS.

La ROM 31, secondo la presente invenzione, comprende moduli di programma sviluppati in fase di progetto del sistema di misura

10 ed atti ad implementare il metodo secondo l'invenzione, come verrà più avanti descritto in dettaglio.

Tali moduli di programma, come potrà facilmente essere compreso da un tecnico del settore, possono anche essere memorizzati nella RAM 33 mediante dispositivi di lettura, non evidenziati in figura, atti sia a leggere da opportuni prodotti informatici i moduli di programma secondo l'invenzione che a memorizzare nella RAM 33 stessa tali moduli di programma.

Con riferimento al sistema di misura 10, il metodo secondo la presente invenzione si basa sull'ipotesi di radiazioni a larga banda con componenti spettrali che si propagano conformemente con la teoria degli Stati Principali di Polarizzazione (PSPs).

In particolare, con riferimento al sistema di misura 10, il metodo secondo l'invenzione si basa sul seguente modello interpretativo ed i corrispondenti passaggi logico-matematici:

- (a) lo spettro della sorgente ottica (incoerente) viene approssimato a tratti da una famiglia di intervalli spettrali di estensione  $\Delta\nu$  (Fig.3), ognuno descritto dalla sua ampiezza, dal suo stato casuale di polarizzazione e da un fattore di fase pure stocastico,
- (b) la larghezza spettrale dell'intervallo è specificata rispetto alla banda dei PSP e alla larghezza di banda dell'amplificatore 38, in modo da ottenere

un'approssimazione ragionevolmente accurata dello spettro della sorgente ottica 21,

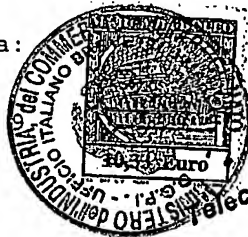
(c) si utilizza una descrizione statistica della propagazione ottica all'interno della fibra in misura, in termini di insieme (dell'ensemble) di intervalli spettrali sopra definito, ensemble che eccita un insieme statistico di PSP,

(d) si ottiene così lo spettro d'uscita del segnale, che viene a dipendere da un insieme di parametri statistici: ampiezze di proiezione sui PSP e sugli assi dell'analizzatore di polarizzazione, valori di DGD e fattori di fase;

(e) la fotocorrente interferometrica si esprime in funzione dello spettro di potenza della sorgente ottica 21 e della densità di probabilità del DGD determinato dalla PMD della fibra 11.

Il risultato ottenuto al punto (e) rappresenta uno degli elementi caratteristici della presente invenzione e viene applicato per implementare il metodo secondo la presente invenzione.

In particolare, in base al modello proposto, illustrato in Fig.3, lo spettro  $S_m(v)$  di una sorgente polarizzata in modo casuale viene suddiviso in  $M-N$  intervalli spettrali rettangolari  $S_i(v)$  aventi larghezza  $\Delta v$  e ampiezza  $U_n$  secondo la seguente espressione matematica:



Telecom Italia Lab S.p.A.

$$S_{in}(\nu) = \sum_{n=-N}^M U_n p_n S_e(\nu - n\Delta\nu) e^{j\phi_n} \quad (1)$$

Ogni replica traslata in frequenza dell'intervallo fondamentale ha uno stato di polarizzazione ed un fattore di fase rappresentati da vettori statistici  $p_n$  e da variabili stocastiche  $\phi_n$  indipendenti.

La scelta della larghezza spettrale  $\Delta\nu$  è vincolata da due estremi di natura fisica. Il limite superiore per  $\Delta\nu$  è la minima banda dei PSP nel dominio spettrale della sorgente ottica 21 (Fig.2, Fig.3), poiché si suppone che ogni intervallo spettrale si propaghi secondo il modello dei PSP al prim'ordine. Questo limite superiore è, come noto, dell'ordine dell'inverso del DGD medio per la fibra in misura e cade nella gamma dei GHz anche per valori di DGD di decine di picosecondi. D'altro canto, il limite inferiore per  $\Delta\nu$  è imposto dal modulo opto-elettronico 37 e dall'amplificatore 38, che, come noto, ha una banda limitata, come esposto in dettaglio nel seguito e può cadere nella gamma delle centinaia di kHz.

Un valore di  $\Delta\nu$  scelto all'interno del dominio di frequenze individuato da tali limiti superiore ed inferiore è da considerarsi adatto per un'approssimazione costante a tratti e sufficientemente accurata per tutte le sorgenti ottiche a LED d'uso comune negli apparati IM (10); inoltre questa conclusione

conferma che l'approssimazione proposta nell'espressione matematica (1) ha corretti fondamenti fisici.

L'insieme di intervalli spettrali  $\{U_n S_e(v - n\Delta v)\}$ , dopo essere stato lanciato nella fibra 11, eccita un insieme di coppie di PSP, ognuna caratterizzata dal valore  $\Delta\tau_n$  di DGD. All'estremità d'ingresso della fibra, gli intervalli spettrali elementari vengono proiettati sui PSP lento e veloce, con ampiezze rispettive  $\sqrt{\alpha_n}$  e  $\sqrt{1-\alpha_n}$ ; in cui  $\alpha_n$  rappresenta il coefficiente d'accoppiamento in potenza tra l'intervallo  $n$ -esimo e l'asse associato al PSP veloce.

In modo analogo, all'uscita della fibra 11, i coefficienti di proiezione dei PSP d'uscita sull'asse di polarizzazione dell'interferometro vengono indicati con  $\sqrt{\beta_n}$  e  $\sqrt{1-\beta_n}$ . Lo spettro del segnale dopo quest'ultima selezione in polarizzazione si esprime allora nella forma:

$$S_{out}(v) = \sum_{n=N}^M a_n U_n S_e(v - n\Delta v) e^{-j2\pi v \Delta\tau_n / 2} e^{j\phi_n} + \sum_{n=N}^M b_n U_n S_e(v - n\Delta v) e^{j2\pi v \Delta\tau_n / 2} e^{j\phi_n} \quad (2)$$

in cui sono state introdotte per convenienza le due nuove variabili statistiche  $a_n = \sqrt{\alpha_n \beta_n}$  and  $b_n = \sqrt{(1-\alpha_n)(1-\beta_n)}$ .

Il valore medio del DGD dei PSP è stato trascurato, riferendo le quantità  $\Delta\tau_n$  all'origine dei ritardi impostati all'interferometro.

Poiché nel dominio del tempo, come noto, la foto-corrente interferometrica  $I$  è proporzionale alla funzione d'autocorrelazione del segnale d'uscita, nel dominio delle frequenze la grandezza da calcolare è lo spettro di potenza  $|S_{out}(\nu)|^2$ :

$$I(\nu) \propto S_{out}(\nu) \cdot S_{out}^*(\nu) = \left( \sum_{n=N}^M a_n U_n S_e(\nu - n\Delta\nu) e^{-j2\pi\nu\Delta\tau_n/2} e^{j\phi_n} + \sum_{n=N}^M b_n U_n S_e(\nu - n\Delta\nu) e^{j2\pi\nu\Delta\tau_n/2} e^{j\phi_n} \right) \cdot (c.c.) \quad (3)$$

relazione nella quale 'c.c' indica l'espressione complessa coniugata del termine in parentesi tonde.

Secondo la presente invenzione, viene qui di seguito dimostrato che l'interferenza tra intervalli spettrali  $S_e(\nu - n\Delta\nu) e^{j\phi_n}$  differenti non dà origine ad alcun contributo significativo alla foto-corrente e pertanto può essere trascurato.

A tale scopo, viene ora discussa in dettaglio l'espressione della fotocorrente generata dal modulo opto-elettronico (rivelatore) 37 e dall'amplificatore 38, con particolare riferimento alla limitazione di banda del rivelatore 37 e dell'amplificatore 38.

Il modulo del campo incidente sul modulo opto-elettronico 37 ha, come noto, la seguente espressione:

$$E_P(t, T) = \frac{1}{2} [E_{IN}(t) + E_{IN}(t+T)],$$

in cui  $T=2\frac{n}{c}(L_1-L_2)$  è il ritardo introdotto dallo sbilanciamento dell'interferometro,  $E_P(t, T)$  è il campo elettrico incidente sul modulo opto-elettronico 37 e  $E_{IN}(t)$  è il campo elettrico del segnale all'uscita della fibra.

È opportuno osservare che tutti i segnali dipendono da due variabili: la variabile  $t$  è la variabile temporale sulla quale vengono misurati i segnali, con un dominio coincidente con l'intervallo temporale di misura (tipicamente qualche secondo). La variabile  $T$  è, come già detto, il ritardo introdotto dallo sbilanciamento dell'interferometro 25, con un dominio che coincide con l'intervallo di DGD di interesse, tipicamente  $[0.1, 100]$  ps. Il processo di fotorivelazione quadratica e di amplificazione elettrica è caratterizzato, trascurando le costanti di conversione delle grandezze fisiche, dalle seguenti relazioni tra i segnali:

$$I_R(t, T) = E_P^2(t, T) = \frac{1}{4} [E_{IN}(t) + E_{IN}(t+T)]^2 = \frac{1}{4} [E_{IN}^2(t) + E_{IN}^2(t+T) + 2E_{IN}(t)E_{IN}(t+T)]$$

$$I(t, T) = I_R(t, T) * h(t) = \frac{1}{4} [E_{IN}^2(t) + E_{IN}^2(t+T) + 2E_{IN}(t)E_{IN}(t+T)] * h(t)$$

in cui  $I_R(t, T)$  è la corrente generata dal modulo opto-elettronico 37 ed inviata all'amplificatore 38,  $I(t, T)$  è la corrente all'uscita dell'amplificatore 38 e  $h(t)$  è la risposta



impulsiva dell'amplificatore 38 a banda limitata, che, naturalmente, dipende solo dalla variabile  $t$ .

Ricordando che i segnali  $E_{IN}(t)$  ed  $E_{IN}(t+T)$  sono alle frequenze ottiche e che nessun amplificatore elettrico è in grado di inseguirne la variazioni si ottiene:

$$I(t,T) = I_R * h(t) \propto \langle E_{IN}^2(t) \rangle_{1/B} + \langle E_{IN}^2(t+T) \rangle_{1/B} + 2E_{IN}(t)E_{IN}(t+T) * h(t)$$

in cui il simbolo  $\langle \rangle_{1/B}$  indica la media temporale calcolata su di un intervallo dell'ordine del reciproco della banda dell'amplificatore 38.

Poiché la componente continua non porta informazione e viene soppressa dagli strumenti di misura della PMD, conviene considerare solo la componente alternata del segnale precedente:

$$I_{AC}(t,T) \propto E_{IN}(t)E_{IN}(t+T) * h'(t)$$

in cui lo spettro di  $h'(t)$  coincide con quello di  $h(t)$ , tranne nell'origine dove si annulla.

Nel dominio della frequenza, calcolando le trasformate di Fourier rispetto alla variabile  $t$ , si ottiene:

$$\tilde{I}_{AC}(f,T) \propto [\tilde{E}_{IN}(f) * \tilde{E}_{IN}(f)e^{j2\pi fT}] \cdot \tilde{H}(f) \quad (4)$$



Si vede subito che, le componenti spettrali della convoluzione tra parentesi che eccedono la banda dell'amplificatore 38, vengono tagliate dall'amplificatore stesso 38.

È chiaro che, essendo il segnale  $E_{IN}(f)$  a banda molto larga, tipicamente alcuni THz, per procedere nell'analisi è necessario ricorrere alla suddivisione dello spettro in settori:

$$\tilde{E}_{IN}(f) = \sum_{n=-M}^M S_e(f - n\Delta f) e^{j\theta_n}.$$

Sostituendo tale espressione nella (4) si ottiene;

$$\tilde{I}_{AC}(f, T) \propto \left[ \sum_{n=-M}^M S_e(f - n\Delta f) e^{j\theta_n} * \sum_{n=-M}^M S_e(f - n\Delta f) e^{j\theta_n} e^{j2\pi f T} \right] \cdot \tilde{H}'(f) \quad (5)$$

Secondo la presente invenzione, è ora possibile dimostrare che, in condizioni tipiche di misura e con amplificatori di uso comune, grazie al rapporto tra la banda  $B$  dell'amplificatore e l'estensione  $\Delta f$  dei settori spettrali, è possibile ridurre l'espressione (5) alla forma diagonale.

Si consideri, dunque, la convoluzione di due settori spettrali rettangoli adiacenti  $r_1(f)$  ed  $r_2(f)$  di ampiezza  $A$  e banda  $\Delta f$ :

$$r_1(f) * r_2(f) = A^2 f, \quad 0 \leq f \leq \Delta f$$

Nel seguito verrà considerata anche la convoluzione di un settore spettrale elementare con se stesso:

$$r_1(f) * r_1(f) = -A^2 f + A^2 \Delta f, \quad 0 \leq f \leq \Delta f$$

Per valutare l'influenza della convoluzione di settori adiacenti sulla fotocorrente, si può calcolare il rapporto tra le energie delle due convoluzioni precedenti nella banda dell'amplificatore 38:

$$SNR = \frac{E_{11}}{E_{12}} = \frac{\int_0^B [r_1(f) * r_1(f)]^2 df}{\int_0^B [r_1(f) * r_2(f)]^2 df} = \frac{\int_0^B [-A^2 f + A^2 \Delta f]^2 df}{\int_0^B [A^2 f]^2 df} = \frac{\int_0^B [A^4 f^2 - 2A^4 f \Delta f + A^4 \Delta f^2] df}{\int_0^B [A^4 f^2] df}$$

$$SNR = \frac{E_{11}}{E_{12}} = \frac{\left[ \frac{A^4}{3} f^3 + A^4 f \Delta f^2 - A^4 f^2 \Delta f \right]_0^B}{\left[ \frac{A^4}{3} f^3 \right]_0^B} = \frac{\frac{A^4 B}{3} (B^2 + 3\Delta f^2 - 3\Delta f B)}{\frac{A^4 B^3}{3}} = \frac{(B^2 + 3\Delta f^2 - 3\Delta f B)}{B^2}$$

Posto  $k = \Delta f/B$ , si calcola facilmente:

$$SNR = 3k^2 - 3k + 1.$$

Tale valore va ulteriormente diviso per due tenendo conto che ciascun settore possiede due settori adiacenti. Nella tabella 1 seguente viene riportato il valore del  $SNR/2$  così calcolato in funzione del rapporto  $\Delta f/B$ .

$\Delta f/B$	$SNR/2$ (lin.)	$SNR/2$ (dB)
2	3.5	5.45
3	9.5	9.79
4	18.5	12.68
5	30.5	14.78
6	45.5	16.59
10	135.5	21.32

Tab. 1

Si vede che per  $k=3$  il valore del  $SNR/2$  supera già 10 dB e raggiunge quasi 22 dB per  $k=10$ .

Quindi, si può concludere che, scelto opportunamente il rapporto  $k=\Delta f/B$ , il contributo prevalente alla convoluzione nella (2) è dato dalla somma delle convoluzioni dei termini omologhi, e quindi la corrente fotorivelata dal modulo optoelettronico 37\_è calcolabile come:

$$\tilde{I}_{AC}(f, T) \propto \left[ \sum_{n=-M}^M S_e(f - n\Delta f) e^{j\phi_n} * S_e(f - n\Delta f) e^{j\phi_n} e^{j2\pi f T} \right] \cdot \tilde{H}(f)$$



Utilizzando il risultato appena ottenuto, solo i termini diagonali dell'equazione (3) sopravvivono e la fotocorrente  $I(v)$  assume la forma:

$$I(v) \propto \sum_{n=-N}^M (a_n^2 + b_n^2) U_n^2 |S_e(v - n\Delta v)|^2 + \sum_{n=-N}^M (a_n b_n) U_n^2 |S_e(v - n\Delta v)|^2 \left( e^{-j2\pi v \Delta \tau_n} + e^{j2\pi v \Delta \tau_n} \right) \quad (7)$$

L'equazione (7) è, secondo la presente invenzione, l'espressione più generale della fotocorrente nel dominio della frequenza che si possa ottenere senza fare ipotesi sulla natura statistica della PMD della fibra sottoposta a misura. Nel seguito verranno esaminati separatamente i due casi di fibra con PMD deterministica e PMD aleatoria.

Una fibra ottica con una birifrangenza deterministica (per esempio, una fibra a mantenimento di polarizzazione) è caratterizzata da DGD e PSP costanti in funzione della frequenza. Di conseguenza:  $\Delta\tau_n = \Delta\tau$ ,  $a_n = a$ ,  $b_n = b$  sono costanti e l'equazione (7) si semplifica in:

$$I(\nu) \propto (a^2 + b^2) \sum_{n=N}^M U_n^2 |S_e(\nu - n\Delta\nu)|^2 + ab(e^{-j2\pi\nu\Delta\tau} + e^{j2\pi\nu\Delta\tau}) \sum_{n=N}^M U_n^2 |S_e(\nu - n\Delta\nu)|^2,$$

cioè,

$$I(\nu) \propto (a^2 + b^2) |S_m(\nu)|^2 + ab(e^{-j2\pi\nu\Delta\tau} + e^{j2\pi\nu\Delta\tau}) |S_m(\nu)|^2.$$

Una anti-trasformata di Fourier fornisce direttamente l'espressione della fotocorrente nel dominio del tempo:

$$I(T) \propto (a^2 + b^2) s_c(T) + ab[s_c(T - \Delta\tau) + s_c(T + \Delta\tau)] \quad (8)$$

in cui  $s_c(T)$  è la funzione di autocorrelazione della sorgente, e corrisponde all'anti-trasformata di Fourier di  $|S_m(\nu)|^2$ .

La fotocorrente presenta tre componenti: la funzione di autocorrelazione della sorgente e le sue repliche traslate

attorno ai due punti simmetrici  $\pm \Delta \tau$ . Questo ben noto risultato [1] viene ottenuto con semplici calcoli nell'ambito del modello proposto.

Pertanto, grazie a tale caratteristica i lobi laterali dell'interferogramma hanno la stessa forma del picco centrale e sono localizzati nei due punti  $\pm \Delta \tau$ , simmetrici rispetto il picco centrale.

Il caso di fibra con birifrangenza aleatoria è il più importante in pratica e richiede una trattazione matematica più complicata. L'analisi si fonda sul calcolo del valor medio del processo aleatorio rappresentato dalla fotocorrente  $I(v)$ .

Questo calcolo ha una duplice importanza. Innanzitutto, esso conduce ad un risultato formale semplice ed elegante rappresentato dall'equazione (9). In secondo luogo, dal punto di vista dell'applicazione alla misura di PMD, quest'operazione matematica corrisponde ad un calcolo di medie di diversi interferogrammi misurati, come verrà mostrato nel seguito, consentendo una verifica sperimentale del modello proposto. Dall'equazione (7) si calcola la media statistica  $\langle \cdot \rangle$  della fotocorrente:

$$\langle I(v) \rangle = \left\langle \sum_{n=N}^M (a_n^2 + b_n^2) U_n^2 |S_e(v - n\Delta v)|^2 + \sum_{n=N}^M a_n b_n U_n^2 |S_e(v - n\Delta v)|^2 (e^{-j2\pi v \Delta \tau_n} + e^{j2\pi v \Delta \tau_n}) \right\rangle.$$

Tenendo conto della linearità della media statistica e del fatto che le variabili aleatorie  $\Delta\tau_n$  sono indipendenti dalle variabili aleatorie  $a_n b_n$  e  $(a_n^2 + b_n^2)$  (questa è una conseguenza diretta dell'aleatorietà della birifrangenza della fibra), si ottiene subito:

$$\langle I(\nu) \rangle = \sum_{n=N}^M \langle a_n^2 + b_n^2 \rangle U_n^2 |S_e(\nu - n\Delta\nu)|^2 + \sum_{n=N}^M \langle a_n b_n \rangle U_n^2 |S_e(\nu - n\Delta\nu)|^2 \langle e^{-j2\pi\nu\Delta\tau_n} + e^{j2\pi\nu\Delta\tau_n} \rangle.$$

Poiché la media statistica dell'esponenziale delle variabili aleatorie  $\Delta\tau_n$  è la loro funzione caratteristica  $\Psi_{\Delta\tau_n}(\nu)$ , l'equazione precedente può essere riscritta nella forma:

$$\langle I(\nu) \rangle = \sum_{n=N}^M \langle a_n^2 + b_n^2 \rangle U_n^2 |S_e(\nu - n\Delta\nu)|^2 + \sum_{n=N}^M \langle a_n b_n \rangle U_n^2 |S_e(\nu - n\Delta\nu)|^2 (\Psi_{\Delta\tau_n}(-\nu) + \Psi_{\Delta\tau_n}(\nu)).$$

Inoltre, per una data fibra, le funzioni caratteristiche  $\Psi_{\Delta\tau_n}(\nu)$  e le medie statistiche  $\langle a_n b_n \rangle$  e  $\langle a_n^2 + b_n^2 \rangle$  non dipendono dalla frequenza; cioè non dipendono dall'indice di somma  $n$ . Quindi l'equazione precedente si semplifica in:

$$\langle I(\nu) \rangle = \langle a^2 + b^2 \rangle \sum_{n=N}^M U_n^2 |S_e(\nu - n\Delta\nu)|^2 + \langle ab \rangle (\Psi_{\Delta\tau}(-\nu) + \Psi_{\Delta\tau}(\nu)) \sum_{n=N}^M U_n^2 |S_e(\nu - n\Delta\nu)|^2.$$

Una anti-trasformata di Fourier fornisce la media statistica della fotocorrente nel dominio del tempo:

$$\boxed{\langle I(T) \rangle = \langle a^2 + b^2 \rangle s_e(T) + \langle ab \rangle s_e(T) * [f_{\Delta\tau}(-T) + f_{\Delta\tau}(T)]}, \quad (9)$$

in cui  $f_{\Delta\tau}(T)$  è la densità di probabilità di  $\Delta\tau$ , e l'asterisco indica la convoluzione.

Anche in questo caso la fotocorrente è data da tre contributi. Il primo termine dell'equazione (9) è legato alle proprietà di coerenza della sorgente ottica, ed è rappresentato da un picco localizzato nell'origine dell'asse dei tempi. Il secondo e terzo termine corrispondono a due lobi laterali simmetrici e contengono tutta l'informazione richiesta per la misura della PMD. L'espressione della fotocorrente media, nonostante la simmetria attorno ad un picco in  $T=0$ , è molto diversa da una Gaussiana, per la presenza dei lobi laterali costituiti dalla convoluzione di  $s_c(T)$  con la densità di probabilità del ritardo differenziale di gruppo  $f_{\Delta\tau}(T)$ . Poiché si suppone che il tempo di coerenza della sorgente (cioè la larghezza del picco centrale) sia trascurabile rispetto al DGD medio della fibra, i due lobi laterali rappresentano misure approssimate della densità di probabilità del DGD della fibra. La qualità di questa approssimazione dipende, come detto, dal tempo di coerenza della sorgente utilizzata, e può essere migliorata mediante una appropriata de-convoluzione del diagramma interferometrico misurato con la funzione di autocorrelazione della sorgente medesima  $s_c(T)$  (tale funzione può essere misurata separatamente collegando direttamente la sorgente ottica all'interferometro). Infine, si può affermare



chè l'equazione (9) è una generalizzazione dell'equazione (8) non appena si consideri che la densità di probabilità del DGD di una fibra con birifrangenza sistematica è una funzione  $\delta$  di Dirac.

Pertanto, grazie a tale caratteristica la misura di PMD con tecnica interferometrica si effettua, non con una interpolazione Gaussiana dell'interferogramma, ma bensì con l'analisi di almeno uno dei lobi laterali dell'interferogramma, considerato, secondo la presente invenzione, come misura approssimata della densità di probabilità del DGD associato alla PMD della fibra ottica 11.

La verifica del modello di propagazione, secondo la presente invenzione, è stata effettuata mediante misure simultanee di PMD utilizzando sia il metodo interferometrico, descritto nel presente esempio di realizzazione, che il metodo, pure noto, di analisi agli autovalori della matrice di Jones (JME: Jones Matrix Eigenanalysis).

La fibra sottoposta a prova (50 km di fibra singolo modo convenzionale avvolta in bobina) è stata posta in camera termica ad una temperatura variabile da circa 2 °C a circa 60 °C a passi di 5 °C. Dopo ciascuna variazione, la fibra è stata lasciata stabilizzare prima di effettuare le misure interferometriche e polarimetriche. Sono stati così acquisiti, durante diversi giorni, 15 interferogrammi e 15 misure di DGD



con metodo JME (ciascuna costituita da 91 punti). I dati sono stati quindi elaborati con la seguente procedura:

- è stata calcolata la media degli interferogrammi dopo averli normalizzati;
- tale media è stata confrontata con due repliche simmetriche della densità di probabilità del DGD calcolata dai dati JME.

Si noti che la prima elaborazione è suggerita direttamente dall'interpretazione degli interferogrammi come densità di probabilità e corrisponde al calcolo della foto-corrente media come riportato nell'equazione (9).

In Fig. 4, in cui sono riportati i risultati delle misure, è evidente il buon accordo tra i risultati.

In particolare, dai risultati delle misure, risulta evidente che il picco centrale dell'interferogramma deve essere trascurato in quanto dipende solo dalle caratteristiche di coerenza della sorgente e non dalla PMD della fibra.

Il risultato ottenuto, secondo la presente invenzione, attribuisce alle curve interferometriche un nuovo significato fisico, particolarmente utile per le attività di misura.

Modifiche ovvie o varianti sono possibili alla descrizione di cui sopra, nelle dimensioni, forme, materiali, componenti, elementi circuitali, collegamenti e contatti, così come nei dettagli della circuiteria e della costruzione illustrata e del metodo di operare senza allontanarsi dallo spirito dell'invenzione come precisato dalle rivendicazioni seguenti.

#### RIVENDICAZIONI

1. Metodo per misurare la dispersione di polarizzazione di una fibra ottica applicando un segnale ottico ad un primo capo della fibra (11) ed accoppiando un secondo capo della fibra (111) ad un interferometro (25), tale metodo comprendendo la fase di

- generare per mezzo di detto interferometro (25) almeno un interferogramma comprendente almeno un picco centrale e due lobi laterali aventi un determinato contenuto informativo;

ed essendo caratterizzato dalle fasi di

- elaborare detto interferogramma in modo da misurare il contenuto informativo di almeno uno di detti due lobi laterali;

e

- determinare la dispersione di polarizzazione della fibra associando a detta misura di detto contenuto informativo una funzione densità di probabilità rappresentativa dalla dispersione di polarizzazione (PMD) della fibra sotto forma di ritardo differenziale di gruppo.

2. Metodo secondo la rivendicazione 1 caratterizzato da ciò che detta fase di determinare la dispersione di polarizzazione comprende la fase di

- calcolare la deconvoluzione di detto almeno un lobo laterale con detto picco centrale per cui detta deconvoluzione corrisponde alla densità di probabilità del ritardo differenziale di gruppo determinato dalla PMD della fibra.

3. Metodo secondo la rivendicazione 1 o 2 caratterizzato dall'ulteriore fase di

- determinare una media di misure di detto contenuto informativo cui associare detta densità di probabilità.

4. Metodo secondo una delle rivendicazioni precedenti caratterizzato da ciò che detto contenuto informativo comprende un unico valore numerico determinato dalla posizione nell'interferogramma di detto almeno un lobo laterale.

5. Metodo secondo le rivendicazioni da 1 a 3 caratterizzato da ciò che detto contenuto informativo comprende una pluralità di valori determinati dalla posizione nell'interferogramma di detto almeno un lobo laterale.

6. Prodotto informatico direttamente caricabile nella memoria interna di un dispositivo elettronico di misura e comprendente porzioni di codice software per attuare, quando il prodotto viene fatto eseguire su detto dispositivo elettronico il metodo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni da 1 a 5.

7. Sistema per misurare la dispersione di polarizzazione di una fibra ottica, comprendente

- una sorgente ottica (21) atta a generare un segnale ottico da iniettare nella fibra (11);

- un interferometro (25) associato alla fibra ed atto a generare un interferogramma comprendente almeno un picco centrale e due lobi laterali aventi un determinato contenuto informativo;



caratterizzato da

- un dispositivo (27) collegato a detto interferometro ed atto a

- elaborare detto interferogramma in modo da misurare il contenuto informativo di almeno uno di detti due lobi laterali; e

- determinare la dispersione di polarizzazione della fibra associando a detta misura di detto contenuto informativo una funzione densità di probabilità rappresentativa dalla dispersione di polarizzazione (PMD) della fibra sotto forma di ritardo differenziale di gruppo.

8. Sistema secondo la rivendicazione 7, caratterizzato da ciò che detto dispositivo (27) comprende

- un primo modulo atto a calcolare la deconvoluzione di detto almeno un lobo laterale con detto picco centrale per cui detta deconvoluzione corrisponde alla densità di probabilità del ritardo differenziale di gruppo determinato dalla PMD della fibra.

9. Sistema secondo la rivendicazione 7 o 8, caratterizzato da ciò che detto dispositivo comprende

- un secondo modulo atto a determinare una media di misure di detto contenuto informativo cui associare detta densità di probabilità.

10. Dispositivo per misurare la dispersione di polarizzazione di una fibra ottica in cui siano stati iniettati segnali ottici, comprendente

- un modulo opto-elettronico (37) atto a convertire i segnali ottici in segnali elettrici;

- un dispositivo di visualizzazione (35) atto a generare un interferogramma comprendente almeno un picco centrale e due lobi laterali aventi un determinato contenuto informativo; caratterizzato da

- un'unità di controllo (30) atta a

- misurare il contenuto informativo di almeno uno di detti due lobi laterali; e

- determinare la dispersione di polarizzazione della fibra associando a detta misura di detto contenuto informativo una funzione densità di probabilità rappresentativa dalla dispersione di polarizzazione (PMD) della fibra sotto forma di ritardo differenziale di gruppo.

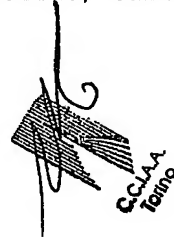
11. Dispositivo secondo la rivendicazione 10, caratterizzato dal fatto di comprendere

- un primo modulo di programma atto a calcolare la deconvoluzione di detto almeno un lobo laterale con detto picco centrale per cui detta deconvoluzione corrisponde alla densità di probabilità del ritardo differenziale di gruppo determinato dalla PMD della fibra.

11. Dispositivo secondo la rivendicazione 10 o 11,  
caratterizzato dal fatto di comprendere  
- un secondo modulo di programma atto a determinare una media  
di misure di detto contenuto informativo cui associare detta  
densità di probabilità.

p.p. Telecom Italia Lab S.p.A.

  
(CASUCCIO, Carlo)

  
CCIAA  
Torino

2002 A000585

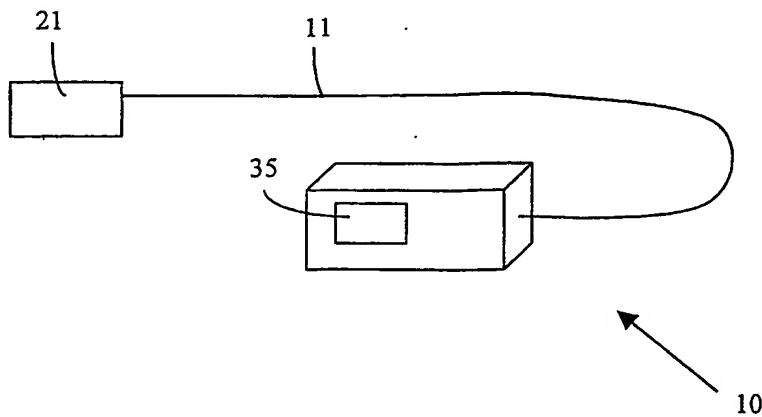


Fig. 1

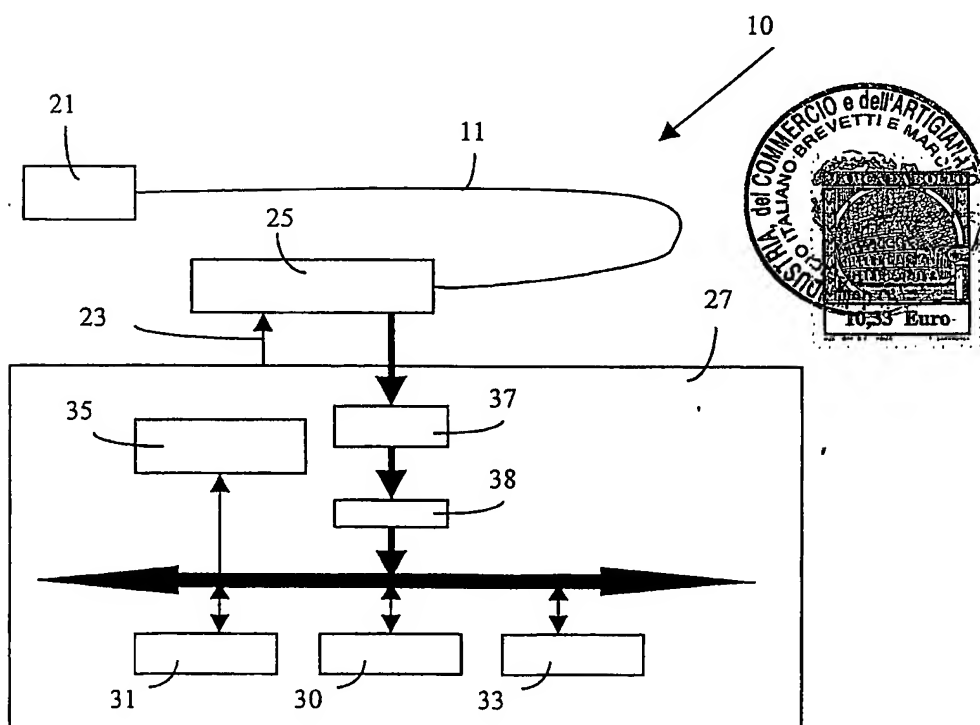


Fig. 2

*[Signature]*  
C. C. A. A.  
Torino

p.p. Telecom Italia Lab

CASUCCIO Carlo  
*[Signature]*

ID 2002 A000585

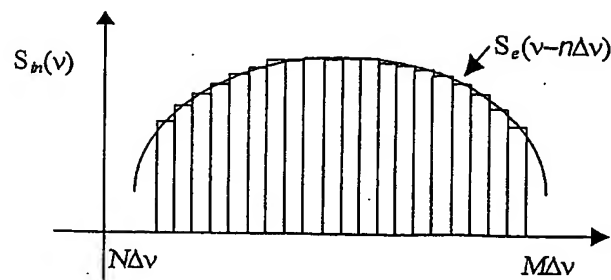


Fig. 3

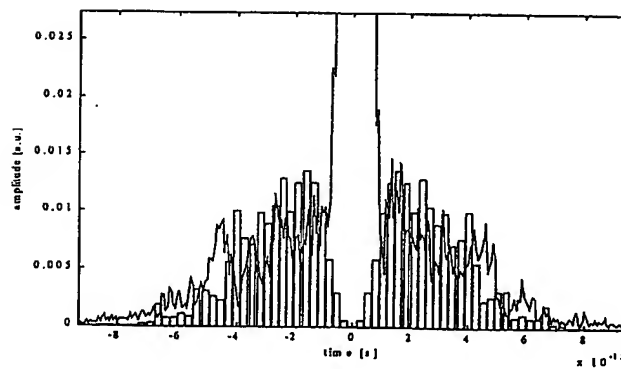


Fig. 4

CCIAA  
Torino

p.p. Telecom Italia Lab

CASUCCIO Carlo



**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ **BLACK BORDERS**
- ☐ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- ☐ **FADED TEXT OR DRAWING**
- ☐ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- ☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**
- ☐ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- ☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**
- ☐ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- ☐ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- ☐ **OTHER:** \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**